

WANG Lianguo, ZHU Yan, ZHANG Baoming, SHEN Weihua, LI Xue, XUE Bin, LI Yuxi, XU Weiming, SUN Shuquan, CAI Zhiguo, WANG Wei.
Design and Verification of Scientific Exploration Mode of Zhurong Mars Rover (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, 43(3): 485–498. DOI:10.11728/cjss2023.03.20220022

祝融号火星车科学探测模式设计与验证*

王连国¹ 朱 岩¹ 张宝明¹ 沈卫华¹
李 雪¹ 薛 彬² 李玉喜³ 徐卫明⁴
孙树全⁵ 蔡治国⁶ 王 蔚¹

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院西安光学精密机械研究所 西安 710068)

3(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100190)

4(中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083)

5(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

6(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘 要 受通信能力低、能源不足等限制,祝融号火星车有效载荷科学探测需提高探测效率,以有限资源获取尽可能多的有效探测数据。祝融号火星车的巡视探测科学任务着眼于火星局部地区,包括火星车行驶时载荷探测和火星车停止时定点就位载荷探测两个主要工况。统筹考虑祝融号火星车移动能力、通信能力、能源能力、热控能力等约束,合理划分工程活动和科学探测活动可用的资源,协调使用火星车的桅杆和移动系统,优化组合各载荷工作模式,设计了高效载荷探测模式。该探测模式与基于工作模式表的自主探测控制方式相结合,解决了资源受限情况下的多载荷协同探测难题。祝融号火星车有效载荷系统圆满完成了预期探测任务,设计的科学探测模式全部得到在轨验证。结果表明这些模式设计合理有效,满足安全、自主、高效开展科学探测的需求。

关键词 祝融号火星车,有效载荷,科学探测模式,移动探测,就位探测

中图分类号 V446

Design and Verification of Scientific Exploration Mode of Zhurong Mars Rover

WANG Lianguo¹ ZHU Yan¹ ZHANG Baoming¹ SHEN Weihua¹ LI Xue¹
XUE Bin² LI Yuxi³ XU Weiming⁴ SUN Shuquan⁵ CAI Zhiguo⁶ WANG Wei¹

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

* 国家航天局探月与航天工程中心首次火星探测项目资助

2022-05-19 收到原稿, 2022-08-24 收到修定稿

E-mail: wanglg@nssc.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

2(Xi'an Institute of Optic and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

3(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

4(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

5(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

6(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076)

Abstract The Zhurong Mars rover conducts high resolution *in situ* surveys in a critical area of Mars. The scientific payloads mounted on the rover include: Navigation and Terrain Camera (NaTeCam), Multispectral Camera (MSCam), Mars Rover Penetrating Radar (RoPeR), Mars Surface Composition Detector (MarSCoDe), Mars Rover Magnetometer (RoMAG) and Mars Climate Station (MCS). Their scientific exploration tasks include studying topography and geological structure of the Mars roving area; surveying the soil structure (profile) of the Mars roving area and searching for water ice; surveying elements, minerals, and rock types of the Mars roving area; and surveying the atmosphere physical characteristics and the surface environment of the Mars roving area. To obtain as much exploration data as possible with limitations on low communication capability and insufficient energy, it is necessary to improve scientific exploration efficiency of the Zhurong Mars rover. There are two major operating conditions for the payloads, conducting roving exploration when the rover moves and in-situ exploration when the rover stops. Several high-efficiency payload exploration modes are developed for those two conditions. When designing the exploration modes, some aspects need to be considered. The first aspect is myriad of constraints, including rover resources and safety, the Martian environment, telecommunication, and the limitations of the software, hardware, and processes involved. The second, the rover is a shared resource: a variety of science and engineering activities must divide the available energy, time, and transmitted data volume, and must coordinate the use of the rover's mast and mobility systems. The third point is that each payload has multiple operating modes that must be optimized and combined. The exploration modes, working with autonomous control based on work mode command set, solved the problem of multiple payloads performing collaborative scientific exploration under resource shortage conditions. The Zhurong Mars rover has successfully completed the scheduled exploration mission. All scientific exploration modes have been verified. The results demonstrate that the exploration modes are suitable and effective, and can meet the requirements for conducting safe, autonomous, and efficient scientific exploration.

Key words Zhurong Mars rover, Payload, Scientific exploration process, Roving exploration, *In situ* exploration

0 引言

2021年5月22日,祝融号火星车行驶到火星表面,开展了环境感知、移动、科学探测等工作。火星车巡视探测科学任务着眼于在火星局部地区开展高精度科学探测,包括火星巡视区形貌和地质构造探测,火星巡视区土壤结构(剖面)探测和水冰探查,火

星巡视区表面元素、矿物和岩石类型探测,以及火星巡视区大气物理特征与表面环境探测^[1]。

为了完成这些科学探测任务,祝融号火星车上配置的科学有效载荷包括导航地形相机、多光谱相机、火星车次表层探测雷达、火星表面成分探测仪、火星表面磁场探测仪和火星气象测量仪。导航地形相机获取沿途地形地貌数据,支持火星车路径规划和探测

目标选择,用于开展形貌特征与地质构造研究;火星车次表层探测雷达获取地表以下分层结构数据,用于浅表层结构分析,探寻可能存在的地下水冰;火星气象测量仪获取气温、气压、风速、风向等气象数据,用于开展大气物理特征的研究;火星表面磁场探测仪获取局部磁场数据;火星表面成分探测仪、多光谱相机获取特定岩石、土壤等典型目标的光谱数据,用于元素和矿物组成等分析研究^[2]。

由于地球与火星距离遥远,通信速率低,延时大,火星车工作时无实时测控,同时能源受限,因此火星车有效载荷的科学探测必须在适应上述约束的前提下,提高探测效率,以有限资源获取尽可能多的有效探测数据,而且还要减少火星车与地面的交互,降低地面运控的复杂度。

受条件约束,NASA的好奇号火星车大多数科学活动安排在火星上的白天进行,在前90个火星日(Martian day, sol)的任务早期阶段,地面运控团队与火星时间基本同步,夜间发送下一个白天的探测计划,白天火星车进行探测。由于火星探测具有探索未知的性质,因此根据有效载荷的灵活性以及火星车的能力,可能以多种方式开展探测任务。然而为了解如何在限制条件下优化科学操作,任务规划团队开发了一组示例火星日工作模型,并将其集成到任务场景中。此场景包含解决任务科学目标的典型科学探测活动,包括火星车行驶和使用的所有仪器^[3]。通过优化设计任务流程,好奇号火星车从2012年8月6日登陆火星至2020年8月5日,已工作2844个火星日,收集了数十万张图像、数千个岩石和土壤目标的约一百万次光谱测量数据、数百万次环境测量数据,分析了33个钻孔岩石或挖掘的土壤样本^[4]。

与好奇号类似,在90个火星日寿命期内,祝融号火星车有效载荷探测也是在火星白天进行的。根据事前掌握的火星环境信息,考虑祝融号火星车的移动能力、通信能力、能源能力、热控能力,各种科学探测活动和工程活动必须划分可用的能源、时间和传输数据量,并且必须协调使用火星车的桅杆和移动系统。为此,设计了典型的火星车移动时载荷探测模式和火星车静止时载荷就位探测模式。在火星表面工作一段时间后,再根据资源条件优化这些探测模式,尽可能发挥火星车及有效载荷的潜力,探索一些拓展载荷探测模式,丰富科学成果。

本文分析了祝融号火星车载荷探测面临的约束条件,根据祝融号火星车探测模式总体设计,阐述了祝融号火星车有效载荷的科学探测模式设计和在轨验证情况。设计的科学探测模式经过在轨验证,满足本次火星巡视探测任务需求,为中国后续深空探测任务火星车载荷探测提供了参考。

1 火星表面巡视探测任务约束

火星表面巡视面临的主要困难是在火星表面复杂地貌和气象条件下,安全、自主、高效地开展移动和探测。巡视探测任务有以下三方面约束条件。

(1) 任务环境新,不确定性大。开展火星探测面临着各种新环境,例如火星稀薄大气、表面风场、全球尘暴、复杂地貌、剧烈变化热流、火星重力等,高低温($-123\sim+27^{\circ}\text{C}$)交变环境直接影响火星车生存^[5]。火星车上载荷要经历发射、地火转移、环火、着陆、火面巡视等阶段,需要适应力学、热、辐照、低气压等特殊环境,载荷设备需要解决白天低温条件下的工作问题,以及夜间极端低温下的存储问题。此外,有效载荷的传感器安装在火星车舱外,面临着火星沙尘的影响,需设计必要的防尘措施,并考虑被沙尘覆盖后的影响。

(2) 资源约束强,重量、能源和数据量约束非常苛刻。受火星弱光照、沙尘等影响,火星车能源并不充足,要尽可能减小设备功率,压缩设备工作时长,这要求载荷设备探测流程应紧凑、高效。火星车90个火星日寿命期内,通过环绕器中继通信,每天仅有2次器间通信窗口,能够下传有效载荷的数据量约为50 Mbit。90个火星日后,环绕器变轨到遥感轨道,每天仅有1次通信窗口或者无通信窗口,下传数据量进一步减少^[6]。因此,各设备要以尽可能少的数据支持科学探测任务,也要压缩上行指令和下行遥测参数。

(3) 自主能力需求高。火星与地球的距离在5700万至4亿千米之间变化,通信速率低(前向 $\leq 64\text{ kbit}\cdot\text{s}^{-1}$,返向 $\leq 2048\text{ kbit}\cdot\text{s}^{-1}$),时延大(6~44 min)。火星车一般通过环火轨道的环绕器中继通信实现与地面的通信,而火星车开展巡视探测时,无中继通信弧段,即无法对火星车进行实时测控。因此针对通信能力有限的约束,要求火星车及有效载荷能够按规划的探测指令计划自主开展工作。

2 祝融号火星车整体探测模式

根据上述探测任务的约束条件,对于每个火星日的探测工作,均应按照总的科学探测任务安排,根据该火星日已知的约束条件进行规划。这些约束条件包括地球与火星的距离、地球与火星时间差、火星车行驶路径地形、通信窗口时间、下行链路数据传输能力、用于科学探测可用能源的时间分布、满足载荷工作温度的时间分布等。

区别于传统的航天器控制,火星车不能事先在地面进行长周期规划,而基于“发令—等待执行效果下行—评估—发令”的模式效率低下,无法满足任务要求。火星车探测模式采用的策略为:地面一次规划、一次上行一个工作日的指令控制序列,火星车存储并按照设计的指令时间执行,期间没有任何地面监督和状态确认操作。后一个火星日的地面规划建立在前一个火星日规划成功执行且地面对火星车当前状态具备全面认知的基础上。指令序列规划管理火星车一整天的资源调度、科学探测、运动以及期间的器务事项。火星车任务规划是在满足多约束条件下,规划火星车在一个火星日内的移动、探测、感知、通信、太

阳翼最优指向等行为计划和行为对应的控制参数,生成火星车行为序列,并最终输出一个火星日的完整指令控制序列和控制策略。考虑火星车自主能力和任务要求,任务规划需基于器上自主和地面规划,令二者独立或者联合,进一步优化扩展火星车行为,在确保安全的前提下,最大化科学探测目标^[7]。

整体上,按照“七日一周期,一日一规划,每日有探测”的高效探测模式,开展火星车的移动模式探测和定点探测。为解决地火通信受限情况下复杂的载荷探测指令无法上行的问题以及载荷工作安全性问题,设计了基于简单指令的高效探测控制模式,地面仅需设定探测目标和模式,大量控制指令由器上自主调用器载工作模式表(指令库)完成。相对于传统指令模式,上行指令条数可大幅减少。为解决地火通信受限情况下的高效探测问题,采用移动与探测综合规划方式,减少器地交互次数,提高探测效率。传统的定点探测通常先移动到探测停泊点,再进行环境感知,经地面确认探测停泊点位置以及探测点位置后再进行探测,需要进行三次器地交互才能完成一个探测点的探测任务。提出的移动与探测综合规划方法的工作模式如图1所示^[6],探测前先进行环境感知,在

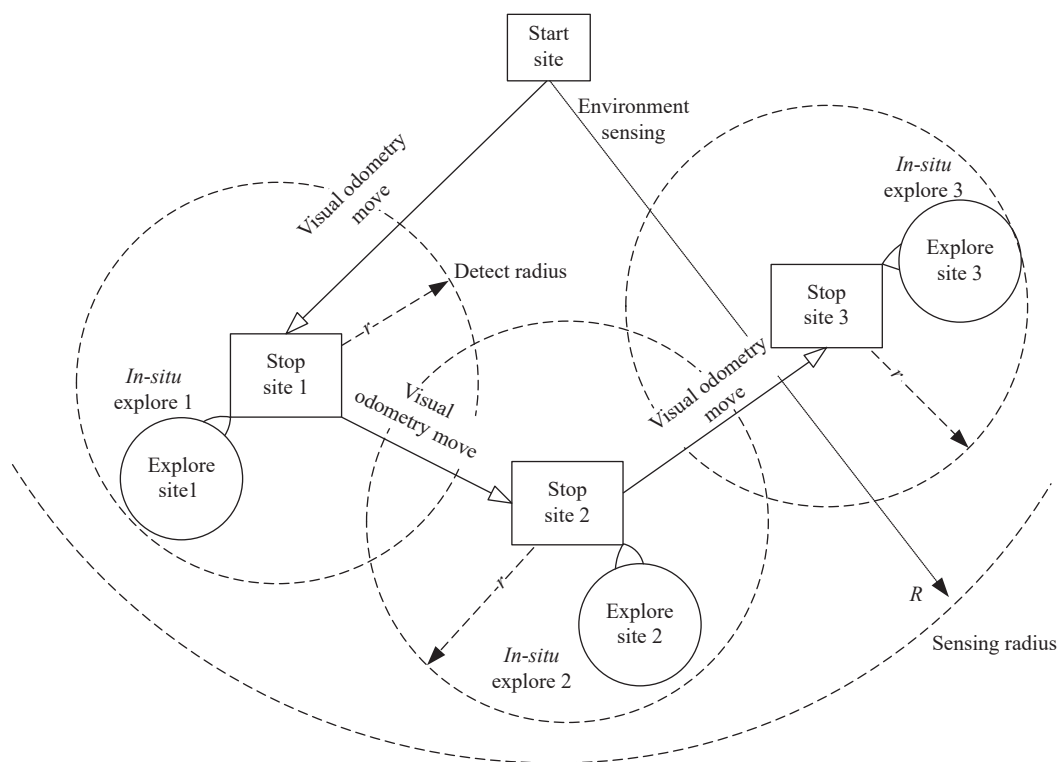


图1 祝融号火星车高效探测工作模式

Fig. 1 Efficient exploration mode of the Zhurong Mars rover

10 m 范围内搜寻到关注点后,地面规划移动到探测停泊点路径,同时在探测停泊点对关注点进行探测规划,火星车按精准移动模式移动至探测停泊点位置,随后按既定规划开展载荷探测。如果希望探测多个关注点,则在第一个探测任务结束后,再按精准移动模式移动到下一个探测停泊点位置,随后按既定规划对下一个关注点进行载荷探测,往复迭代,直至完成最后一个关注点的载荷探测^[6]。

火星车在每个火星日的典型探测流程如图 2 所示。以第 N 个火星日为例(Sol N),Sol N 进行移动探测模式,导航地形相机对沿途地貌进行感知成像,次表层探测雷达、气象测量仪、表面磁场探测仪开机探测。探测数据和感知数据下传地面后,地面运控人员规划 Sol $N+1$ 的探测工作,如果发现沙丘、石块、撞击坑、泥火山等较高价值的科学探测目标,则 Sol $N+1$ 火星车继续按照移动探测模式工作,火星车抵近这些目标。Sol $N+1$ 的探测数据和感知数据下传地

面后,地面运控人员规划 Sol $N+2$ 的探测工作,即进行火星车静止时的定点就位探测。在 Sol $N+2$,载荷进行就位模式探测,即利用多光谱相机进行拍照,表面成分探测仪进行 LIBS(Laser Induced Breakdown Spectroscopy)光谱采集、被动光谱采集、显微成像,获取目标的光谱数据,用于元素和矿物组成研究。同时,在就位探测时,气象测量仪、表面磁场探测仪也开机工作,获取该区域的磁场和气象参数。Sol $N+2$ 探测数据和感知数据下传后,地面运控人员规划 Sol $N+3$ 的探测工作,可以选择再次对该处目标进行定点就位探测,也可以开始下一次移动模式探测。以此类推,实现“一日一规划,每日有探测”。

3 有效载荷科学探测模式设计

3.1 各载荷工作模式与工作条件

为完成火星车科学探测任务,火星车有效载荷设

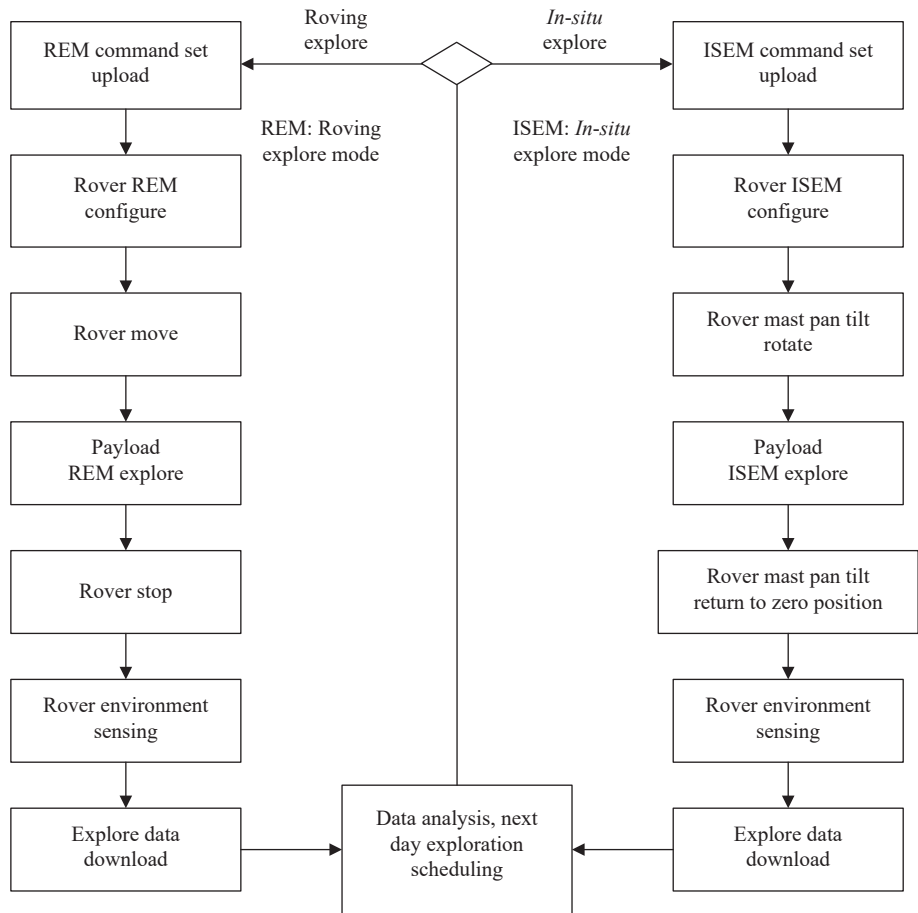


图 2 祝融号火星车典型探测流程

Fig. 2 Zhurong Mars rover typical exploration process

置了多种工作模式,通过构建满足约束条件的工作模式组合,完成探测任务。各载荷单机的工作模式说明如下。

导航地形相机。导航地形相机兼具用于火星车导航的工程相机和用于火星表面地形地貌勘察的科学探测载荷功能。导航地形相机具有自动曝光和手动曝光模式,通常使用自动曝光模式,相机加电后,设置自动曝光后成像,即可获取彩色图像。

多光谱相机。拍照模式:相机通过调整滤光轮位置切换光谱通道,通过调焦寻找最佳焦面,获取单张图像数据。在轨定标模式:相机通过放置于火星车上的标准定标板实现在轨定标。

火星车次表层探测雷达。雷达发射和接收信号,处理并产生探测数据。雷达探测模式设计了两种工作方式,分别为定时触发和定距离触发。定时触发方式根据指令设置的固定周期触发雷达进行探测。定距离触发方式根据火星车行驶速度和按指令设置的行进距离采样间隔要求,计算工作时的触发时刻,触发雷达进行探测。

火星表面成分探测仪。LIBS 光谱采集模式:二维指向镜指向选定的目标点,启动聚焦机构对目标进行聚焦,然后发射高密度激光使得目标物质电离形成等离子体,用紫外-可见近红外光谱段对等离子体光谱进行采集,光谱采集结束后,启动显微相机对目标进行显微成像。被动短波红外光谱采集模式:二维指向镜指向选定的目标点,用短波红外光谱段接收目标反射的太阳光辐射,根据设定的光谱波段和波长范围进行光谱数据采集,显微相机也可根据需要进行成像。在轨定标模式:通过采集携带的标准样品光谱数据,对仪器进行标定。

火星表面磁场探测仪。正常采样模式:火星车静止时,设备加电即进入正常采样模式,连续对磁场进行测量。高采样率模式:正常观测时,如遇强太阳风

暴爆发,自动切换或通过指令切换到高采样率模式。

火星气象测量仪。常规测量模式:分为气温气压风场常规测量模式和声音常规测量模式。气温气压风场常规测量模式下,所有传感器每 60 min 测量 1 次,每次测量 5 min,采样频率 1 Hz。声音常规测量模式下,每 60 min 测量 1 次,每次测量 10 s,采样率 5 kHz,放大倍数为 1,声音压缩率为 16:4。机动测量模式:由控制命令配置可以选择气温、气压、风速风向、声音等被测量,也可配置被测量的采样率、采样时间、放大倍数和数据压缩等参数。

有效载荷工作时需满足一些约束条件,包括火星车运动状态,火星车位置、朝向,桅杆云台的位置等,如表 1 所示。另外,还需满足工作时间、工作时长以及数据量约束。在火面工作期间,有效载荷科学探测活动的规划控制命令一般在夜间通过 UHF 器间(环绕器与火星车)通信发送给火星车,有效载荷科学探测活动一般在下一个火星日的上午或中午进行,探测结果在下午通过器间 UHF 通信下传^[8]。受火星车能源限制,有效载荷每日工作时间通常不超过 100 min。每日产生的数据量不超过 50 Mbit,每次移动模式探测的数据量能够满足这个约束,每次定点就位探测的数据量约 185 Mbit,需分多日下传至地面。

3.2 有效载荷探测模式设计

有效载荷探测模式设计的原则是在符合工作条件约束的前提下,对各载荷工作模式进行优化组合,使得探测结果能够满足探测任务需求。

火星车行驶到火星表面后,开展环境感知、移动、科学探测等工作,有效载荷在火星上的典型探测模式列于表 2。在释放分离阶段,第 8 个火星日,火星车沿坡道机构从着陆平台行驶到火星表面过程中,采用探测模式 1,即气象测量仪使用机动测量模式采集火星车驶离时产生的声音。在释放分离阶段,第 11 和 14 个火星日,火星车移动时,按照移动探测模式

表 1 有效载荷工作条件约束矩阵

Table 1 Constraint matrix of payload working condition

火星车运动状态		火星车位置、朝向	火星车桅杆云台
多光谱相机	静止	接近和朝向探测目标,距离目标大于 1.5 m	桅杆云台转动,使多光谱相机指向目标
次表层探测雷达	行驶	无约束	无约束
表面成分探测仪	静止	接近和朝向探测目标,距离目标 2~5 m,目标在其二维指向镜指向范围内,太阳高度角不小于 30°	无约束
表面磁场探测仪	静止	无约束	桅杆云台处于零位
气象测量仪	行驶和静止都可	无约束	桅杆云台处于零位

表 2 有效载荷典型探测模式
Table 2 Payload typical exploration mode

飞行阶段	对应飞行程序	多光谱相机	次表层探测雷达	表面成分探测仪	磁场探测仪	气象测量仪	时长	数据量
释放分离	第8个火星日, 探测模式1	×	×	×	×	机动测量模式(声音)	根据火星车移动时间	约12 Mbit(移动10 m时)
	第11、14个火星日, 移动模式	×	定距离触发模式	×	×	常规测量模式1(气温气压风场)	根据火星车移动时间	约12 Mbit(移动10 m时)
火面科学探测	火星车移动时, 移动模式探测	×	定距离触发模式	×	正常采样模式(火星车移动结束后)	机动测量模式(气温气压风场)	根据火星车移动时间	约28 Mbit(移动20 m时)
	火星车静止时, 探测模式2探测	对标定板和前方2个目标进行8谱段拍照	×	3个LIBS标样在轨定标, 2个短波标样在轨定标; 对2个目标进行LIBS光谱采集模式、显微成像、被动短波红外光谱采集模式	正常采样模式	机动测量模式(气温气压风场声音)	91 min	185 Mbit(多光谱相机图像114 Mbit, 其他载荷约71 Mbit)
	火星车静止时, 探测模式3探测	×	×	×	正常采样模式	机动测量模式(气温气压风场声音)	82 min	约5 Mbit

注 × 表示该载荷不工作。

工作, 即次表层探测雷达按照定距离触发进行探测, 气象测量仪进行气温、气压、风速、风向测量。火面科学探测阶段是有效载荷的主要工作阶段, 火星车移动时, 按照移动探测模式工作, 次表层探测雷达按照定距离触发进行探测, 气象测量仪进行气温、气压、风速、风向测量, 火星车移动停止后, 表面磁场探测仪进行磁场探测。火星车静止时, 主要按照探测模式2开展定点就位探测, 多光谱相机进行定标板拍照和探测目标拍照, 表面成分探测仪进行定标、LIBS光谱采集、被动光谱采集、显微成像, 表面磁场探测仪进行磁场探测, 气象测量仪进行气温、气压、风速、风向测量和声音采集。另外还有一种工作模式, 在火星车静止时, 按照探测模式3进行磁场探测和气温、气压、风速、风向、声音测量。

由于地火数传能力限制, 多光谱相机图像主要采用开窗和缩略图下传的方式, 每个窗口和每个缩略图的数据量均为1 Mbit。探测模式2中, 多光谱相机标定板8谱段拍照, 每幅图开2个窗, 对前方2个目标8谱段拍照, 每幅图开6个窗, 2个目标的谱段1使用缩略图下传, 每次探测总的图像数量为, 定标图像8×2开窗+目标1图像8×6开窗+目标2图像

8×6开窗+目标1图像1×1缩略图+目标2图像1×1缩略图, 共计114幅图(114 Mbit)。探测模式2中, 除多光谱相机图像外, 其他载荷数据量约为71 Mbit。

传统的载荷探测控制方式基于实时指令、延时指令以及指令序列、事件表等, 这些控制方式需要较多的测控资源, 不能适应火星探测通信速率低, 延迟大, 无实时测控等复杂工况。为解决该难题, 采用面向深空载荷探测的高效自主运行与管理技术, 采用基于工作模式表的控制方式, 自主控制多个有效载荷协同工作, 完成不同科学探测任务^[9]。火星车自主按照上注指令计划开展工作时, 火星车平台主要由数管SMU控制, 有效载荷自主科学探测主要由载荷控制器使用工作模式表控制。使用工作模式表的控制方式, 对于原本需要约180条载荷工作指令的探测模式2, 只需6条模式表启动指令即可完成, 极大减少了飞控工作量和器地交互数据量。

在发射前, 将典型的工作模式表存储在载荷控制器的FLASH中。在轨时, 通过指令触发模式表工作。如果需要更新模式表, 由地面上注新的模式表, 载荷控制器按照新的工作模式表运行; 如果需将上注

的模式表存储,则通过指令将上注的模式表写入载荷控制器的FLASH中。

设计寿命期内使用的模式表列于表3。其中,模式表0暂未使用,后续有需求时可以使用。模式表4和5分别用于地火转移自检和释放分离自检,后续在火面巡视探测阶段不使用,可以更改为其他用途。

火星车定点就位探测使用探测模式2,多光谱相机、表面成分探测仪、表面磁场探测仪、气象测量仪开机工作。探测模式2是一个优化组合的探测模式,通过使用工作模式表控制多载荷协同工作,提高了探测效率。其执行流程如图3所示,载荷控制器加电后启动工作模式表,通过工作模式表控制各载荷工作。各载荷具体工作流程如下。

表3 设计寿命期内使用的模式表
Table 3 Working mode table used during the nominal mission period

名称	说明	模式表 执行时长	应用的 探测模式
模式表0	空表	—	暂未使用
模式表1	气象测量仪探测	5 min 15 s	移动模式
模式表2	气象测量仪和磁场测量仪探测	81 min	探测模式2、3
模式表3	雷达探测状态设置	22 s	移动模式
模式表4	地火转移自检	16 min 35 s	地火转移自检
模式表5	释放分离自检	17 min 29 s	释放分离自检
模式表6	多光谱相机定标	7 min 10 s	探测模式2
模式表7	表面成分探测仪定标	39 min 47 s	探测模式2
模式表8	多光谱相机探测	6 min	探测模式2
模式表9	表面成分探测仪探测	29 min 50 s	探测模式2

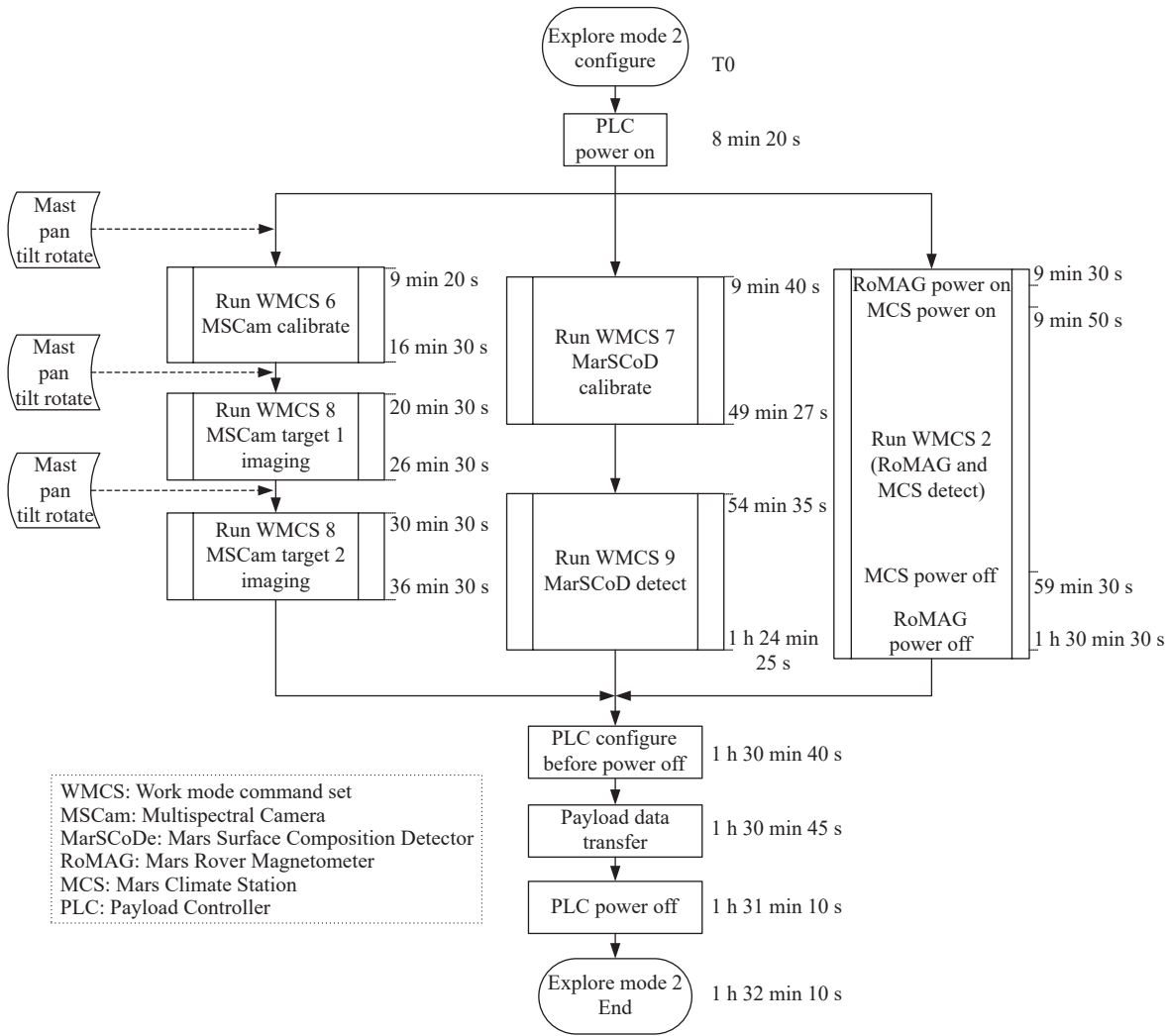


图3 探测模式2流程
Fig. 3 Process of exploration mode 2

桅杆云台转动, 指向位于火星车车体后部的多光谱相机标定板, 多光谱相机使用指令设置调焦参数、曝光方式, 对标定板进行 8 谱段拍照; 然后, 桅杆云台指向地面运控团队选择的位于火星车前方的拍照目标 1, 多光谱相机使用自动调焦、曝光方式, 对目标 1 进行 8 谱段拍照; 之后, 桅杆云台指向地面运控团队选择的位于火星车前方的拍照目标 2, 多光谱相机使用自动调焦、曝光方式, 对目标 2 进行 8 谱段拍照。

表面成分探测仪在工作前先进行热控, 热控结束后, 完成定标。定标包括对位于火星车车体后部 LIBS 定标板的 2 个或 3 个标样分别进行 LIBS 光谱采集、被动光谱采集、显微成像, 对位于火星车车体前部短波定标板的 2 个标样分别进行短波光谱采集。定标结束后, 表面成分探测仪对地面运控团队选择的位于火星车前方的探测目标点 1 和 2 分别进行 LIBS 光谱采集、被动光谱采集、显微成像和短波光谱采集。

表面磁场探测仪在加电后, 按照正常采样模式进行磁场探测。

气象测量仪加电后, 先进行测量参数设置, 然后使用机动测量模式测量气温、气压、风场及声音。

火星车上配置的载荷具有多种功能和工作模式, 除表 2 中的典型探测模式外, 还设计了一些拓展探测模式。通过拓展探测模式, 可进一步发挥仪器设备的能力。同时, 由于火星探测的未知性, 还可以构建发射前未设计的探测模式和流程, 以应对探测过程出现的意外科学探测机遇。火星车有效载荷设计的拓展探测模式说明如下。

表面成分探测仪的常规探测模式是单点位置光谱探测, 重点分析巡视探测区域的化学元素组成和岩石类型, 平均每个探测周期内共获取 2 个探测对象的单点探测。单点位置光谱探测进行 60 次 LIBS 光谱探测, 1 次短波红外光谱探测(150 个波段), 1 次显微成像。

表面成分探测仪的拓展探测模式是进行深度剖面光谱探测和光谱扫描探测。深度剖面光谱探测重点是对火星岩石 10~500 μm 表层以内元素的纵向异性特征和结构进行研究。深度剖面光谱探测对同一个探测对象进行 200 组(每组 50 次)LIBS 光谱探测, 200 次短波红外光谱探测(150 个波段), 第一组和最后一组探测获取显微图像。光谱扫描探测主要目

标是研究化学元素的横向异性特征和岩石的层状特征, 包括线性扫描方式和矩阵扫描方式两种。线性扫描探测按照 10 个扫描点计算, 每个扫描点采用单点位置光谱探测的方式, 共获取 10 组探测数据。矩阵扫描探测按照 3×3 个扫描点计算, 每个扫描点采用单点位置光谱探测的方式, 共获取 9 组探测数据。

表面磁场探测仪的常规探测模式在每个火星日日间工作不超过 81 min, 可拓展进行探测日变化的探测模式。为获取一个火星日火星表面磁场活动的连续数据, 可在火星时 10:00—14:00 期间每 60 min 探测 1 次, 其余时间每 120 min 探测 1 次, 采样频率 1 Hz, 每次至少连续工作 15 min。

气象测量仪的常规探测模式在每个火星日日间工作不超过 50 min, 也可拓展进行探测日变化的探测模式。为获取一个火星日气温、气压、风场等探测数据, 每 60 min 开机 1 次, 采样频率 1 Hz, 每次探测 5 min。

4 在轨验证

2021 年 5 月 15 日火星车成功着陆火星后, 在释放分离阶段的 5 月 22 日进行了探测 1 测试。在 5 月 25 日和 28 日火星车移动时, 进行了移动模式测试。在火面科学探测阶段, 6 月 4 日首次开展了探测 2 测试。之后, 按照“七日一周期, 一日一规划, 每日有探测”的高效探测模式, 开展了火星车移动时的移动模式探测和火星车静止时的定点(探测 2 或探测 3)探测。在探测阶段前期, 主要进行火星车移动探测, 7 日中约 6 日进行移动探测, 1 日进行定点就位探测。

截至 2021 年 8 月 15 日, 火星车在火星表面运行 90 个火星日(约 92 个地球日), 累计行驶 889 m, 完成了设计寿命期内的既定巡视探测任务。全部有效载荷开机工作, 共完成 67 次载荷探测, 其中移动模式探测 54 次, 探测模式 1 探测 1 次, 探测模式 2 探测 12 次。在 90 个火星日设计寿命期内, 有效载荷科学探测均使用典型探测模式, 暂未使用有效载荷拓展探测模式。移动模式探测的工作时间分布如图 4 所示, 探测模式 2 探测的工作时间分布如图 5 所示。

在此仅选取有效载荷的部分典型探测结果, 说明有效载荷探测模式的有效性和正确性, 详细探测结果请见各载荷科学研究团队公布的成果。此外, 为了展示各载荷探测结果的典型性, 没有使用在同一火星日

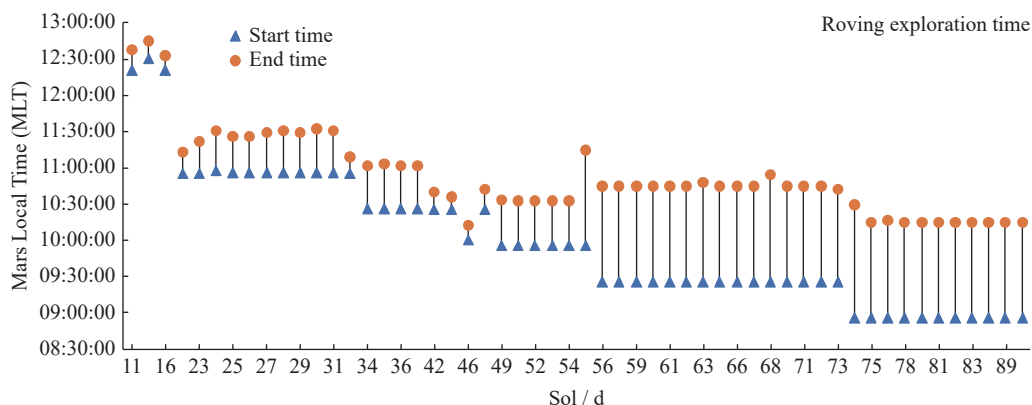


图4 移动模式探测时间分布

Fig. 4 Time distribution of roving exploration

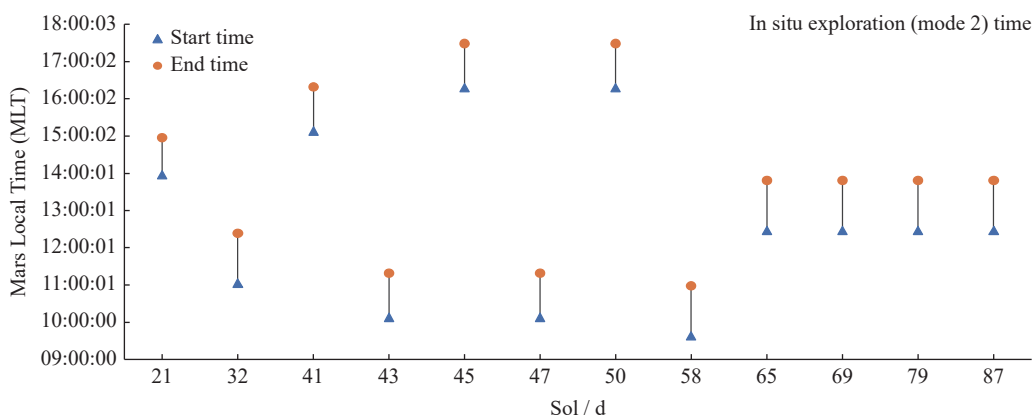


图5 就位探测模式(模式2)探测时间分布

Fig. 5 Time distribution of in situ (mode 2) exploration

获取的科学数据,而是使用不同火星日探测到的典型数据。

火星车次表层探测雷达在火星车行驶过程中进行探测,主要探测巡视区表面土壤厚度、冰层结构,获取火星地表和次表层超宽带全极化回波数据;探测巡

视区次表层结构,获取次表层地质结构。图6和图7是次表层探测雷达在前25个火星日火星车移动70 m的探测结果。图6是低频通道前70 m探测结果,可以看出火星地面表层下方有明显的反射层,可能为不同电磁特性的岩层分界面。图7是高频通道

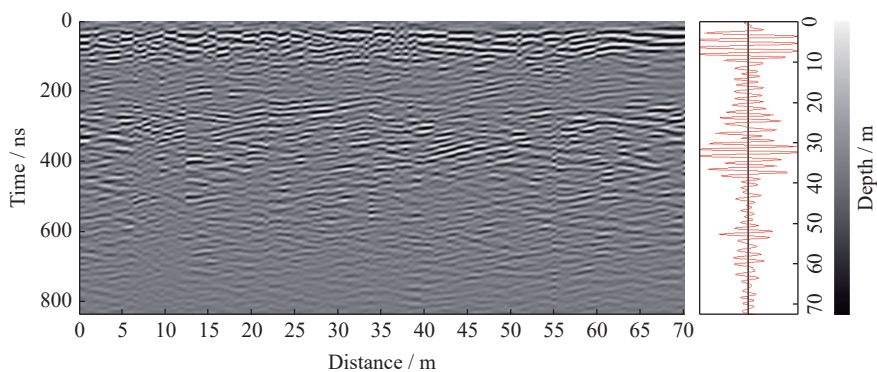


图6 低频通道70 m探测结果

Fig. 6 Measuring result of low frequency channel (70 m)

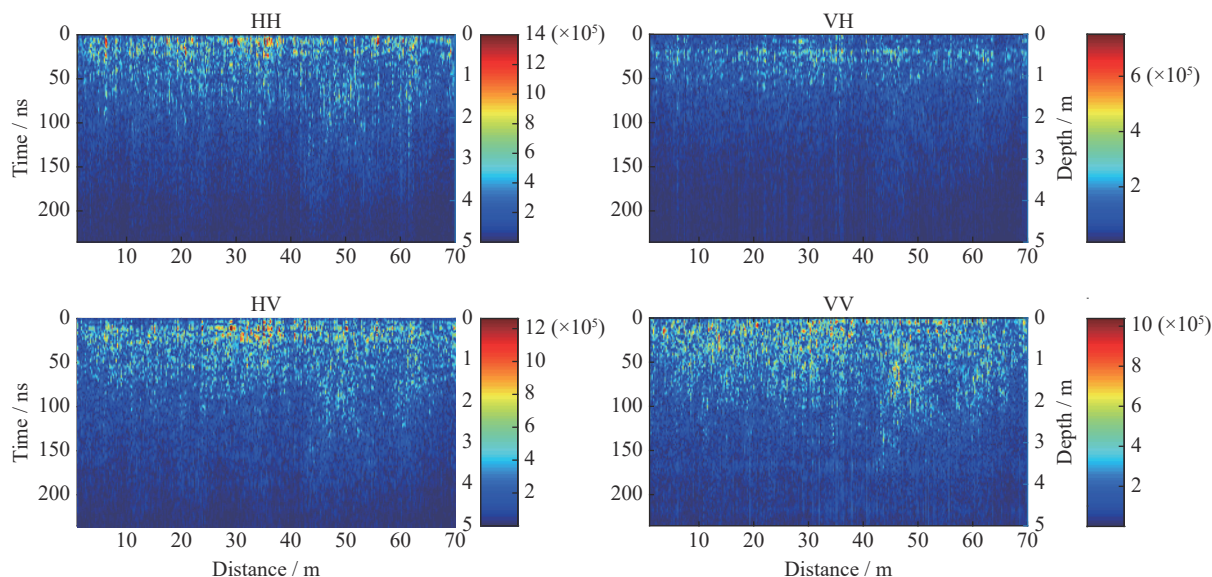


图 7 高频通道 70 m 探测结果 (色条表示目标反射电磁波的相对能量)

Fig. 7 Measuring result of high frequency channel 70 m (The color bar represents the relative energy value of the electromagnetic waves reflected by the target)

前 70 m 结果,可以看出火星地面表层下方有明显的独立离散目标体反射,可能为碎石块的反射。

火星巡视区表面元素、矿物和岩石类型探测的任务由多光谱相机和火星表面成分探测仪通过探测模式 2 共同完成。多光谱相机的任务主要是获取着陆区及巡视区多光谱图像和火星表面物质类型分布。火星表面成分探测仪的任务主要是进行火星表面物质的化学元素组成分析和火星表面矿物分析与岩石识别。火星表面物质的化学元素组成由 LIBS 光谱探测数据定量分析完成,而短波红外光谱探测主要完成矿物分析和岩石识别。

在实施探测模式 2 时,根据导航相机图像进行多光谱相机和表面成分探测仪的探测目标选取。图 8 由导航相机拍摄,是在第 87 个火星日进行定点就位探测选取的探测点位置,图 8 中 D1 和 D2 为多光谱相机的探测点, B1 和 B2 为表面成分探测仪的探测点。本次探测中,多光谱相机和表面成分探测仪均探测了火星车前方的两块岩石, D1 和 B1 位置相同, D2 和 B2 位置相同,在火星车控制本体坐标系下, D1 坐标为 (3.063 m, 0.198 m, 0.277 m), D2 坐标为 (4.183 m, -0.438 m, 0.157 m)。

图 9 给出的是多光谱相机在第 41 个火星日拍摄的火星岩石及光谱反射率曲线,图像清晰,纹理丰富,色彩真实,能够显示火星表面物质的光谱特征。光谱

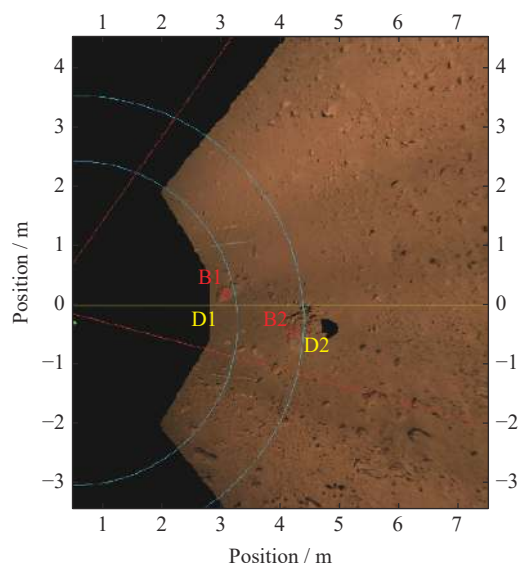


图 8 探测模式 2 选取的探测目标 (图片来源:中国科学院国家天文台)

Fig. 8 Target selected in exploration mode 2 (Picture source: NAOC)

反射率曲线选取图中 6 个点 (以红色圆圈标出) 在 480 ~ 1000 nm 光谱通道范围内的光谱反射率绘制而成, (x, y) 坐标表示这 6 个点在图中的像素位置。

图 10 是表面成分探测仪在第 69 个火星日采集的 LIBS 光谱数据、短波红外 (SWIR) 光谱数据和显微图像, LIBS 光谱探测范围为 240 ~ 850 nm, SWIR

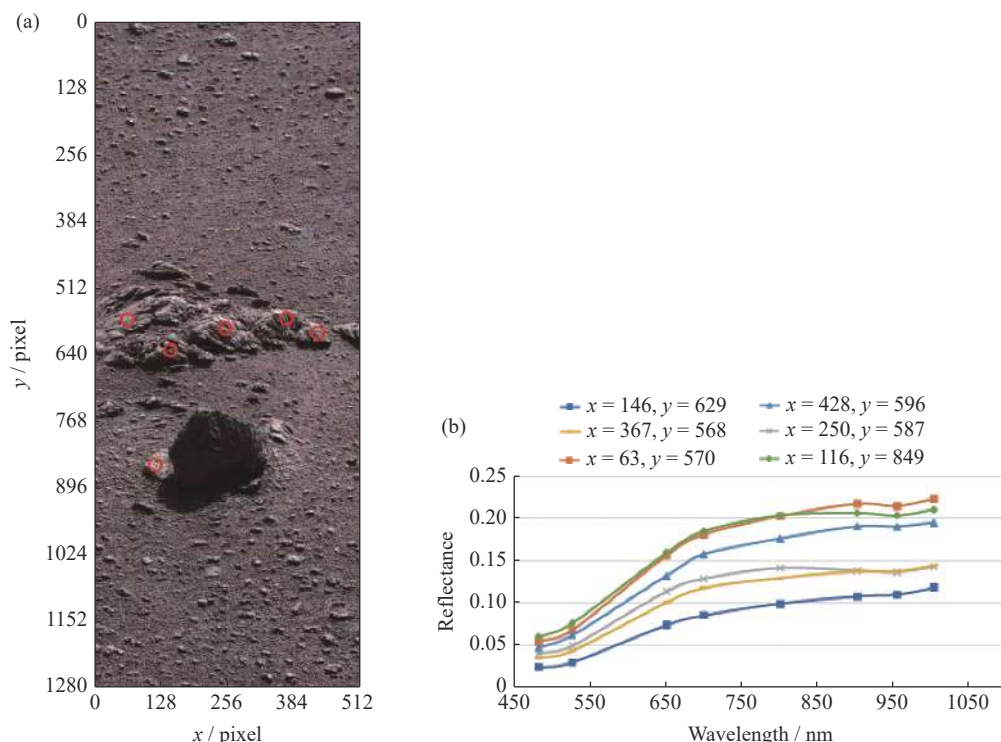


图9 多光谱相机拍摄的岩石及光谱反射率曲线

Fig. 9 Rock and spectral reflectance curves taken by Multispectral Camera

光谱探测范围为 850~2400 nm。图 10(a)显示了采集到的 3 个在轨 LIBS 定标样品和 2 个火星表面目标点的 LIBS 光谱,具有明显且丰富的等离子体辐射谱线,代表了物质元素的特征谱线,能够用于火星表面物质成分的定性与定量分析,LC008, LC003 和 LC001 分别是采集的定标板上钛、安山岩和石膏样品的特征谱线。图 10(b)表示采集到的 2 块短波定标板和 2 个火星表面目标点的 SWIR 光谱,具有明显的吸收峰,能够用于对物质成分分子特征进行定性与定量分析,2 块短波定标样品的反射率分别为 40% 和 99%。图 10(c)(d)是目标点 1 激光激发探测前后的显微图像,图 10(e)(f)是目标点 2 激光激发探测前后的显微图像,这些显微图像具有清晰的纹理特征,并且激光击打前后具有明显变化(图中用红色圈出了图像差异),这些变化可用于描述 LIBS 烧蚀状态。

火星巡视区大气物理特征与表面环境探测由火星表面磁场探测仪和火星气象测量仪共同完成。火星表面磁场探测仪的探测任务是探测着陆区火星磁场,确定火星磁场指数。图 11 给出的是表面磁场探测仪在第 66 个火星日测量的磁场变化结果。在该位置处,火星表面磁场变化较小,三个方向的磁场变化

均在 2 nT 以内,表明该时间段火星空间磁场环境较为平静。

火星气象测量仪测量火星表面大气温度、压力,火星表面风速、风向,拾取火星表面声音。图 12 给出的是火星气象测量仪在第 91 个火星日测量的气温、气压和风场数据。图 12(a)为气温传感器的三路输出结果,可以看到气温测量值约为 $-46.5\sim-43.5^{\circ}\text{C}$,由于受到太阳光照,当地气温逐步升高。图 12(b)为气压传感器测量到的火星表面气压数据曲线,短时间内气压变化量不大(约 5 Pa),符合规律,气压数据的微小变化可能是由传感器周围大气被细微扰动引起的。图 12(c)为风场传感器测量结果,可以看到风速测量值在 $4\sim10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。风向变化范围基本在 $180^{\circ}\sim220^{\circ}$ 内,风向 0° 定义为正北方向, 90° 定义为正东方向,因此该测量点代表的风向为火星当地西南风。

火星车有效载荷在 90 个火星日寿命期内累计获取约 10 GByte 原始数据,这些原始数据已由中国科学院国家天文台完成相关处理和质量验证,并形成标准数据,面向国内科学研究团队开放数据申请,后续科学研究团队将陆续公布科学研究成果。实际在轨应用表明,火星车有效载荷的科学探测模式设计合

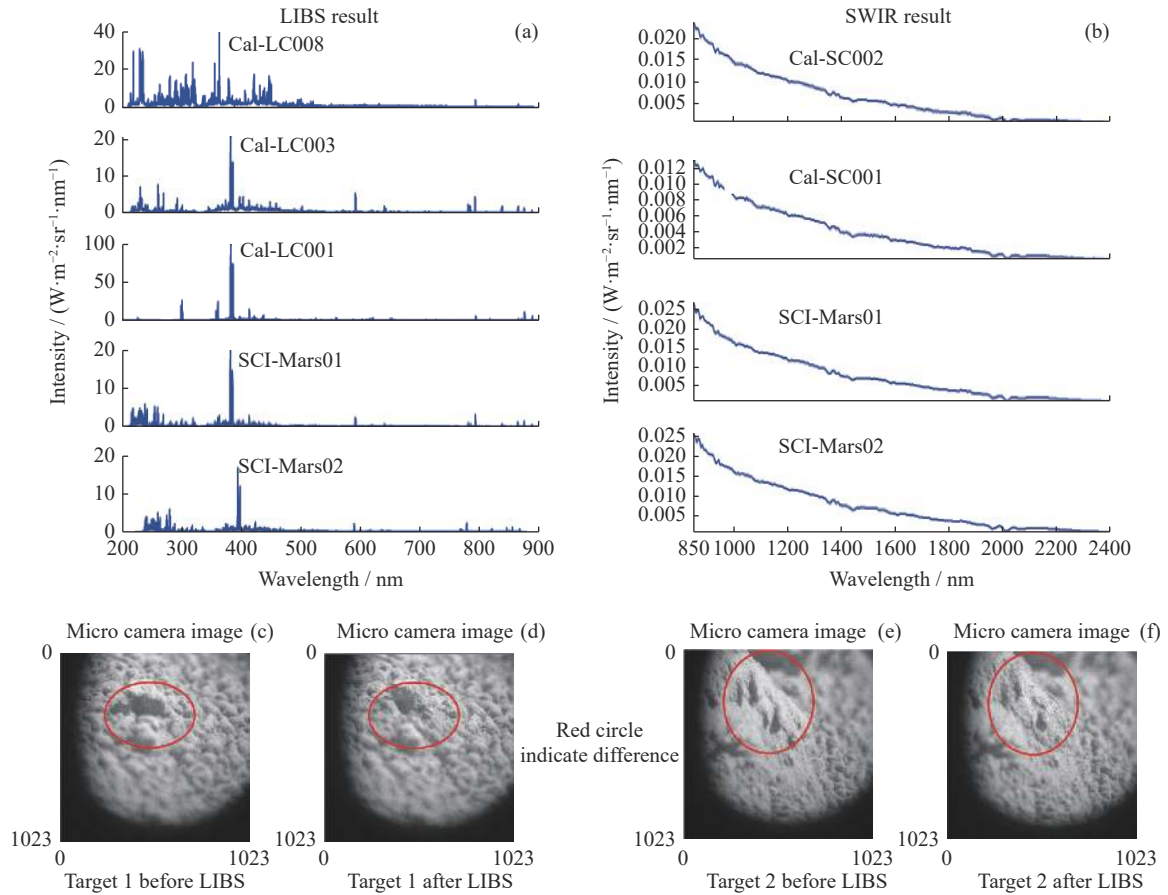


图 10 火星表面成分探测仪探测结果

Fig. 10 Measuring result of Mars Surface Composition Detector

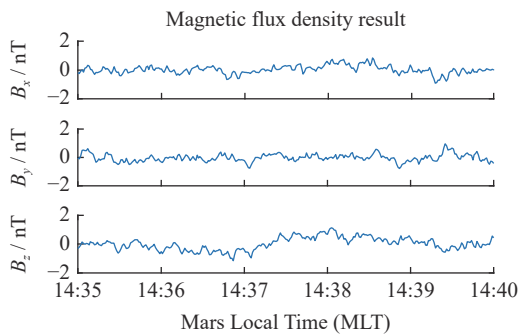


图 11 火星表面磁场探测仪探测结果

Fig. 11 Measuring result of Mars Rover Magnetometer

理、有效,能够适应火星探测通信、能源等约束条件,满足安全、自主、高效开展科学探测的需求。

有效载荷获取的科学数据对区域性精细化科学探测技术进行了验证,各有效载荷的功能及性能指标普遍达到国际先进水平。获取的高精度、高性能指标科学数据,为取得原创性科学成果奠定了坚实基础^[10]。

5 结论

截至 2022 年 5 月 5 日,祝融号火星车在火星表面已工作 347 个火星日,累计行驶 1921 m。有效载荷设备工作正常,在完成既定寿命期内探测任务的基础上,正在完成拓展探测任务。同时,根据科学探索机遇,尝试开展一些其他探测模式,进一步丰富了探测成果。

针对火星表面巡视探测特点设计的科学探测模式,结合高效自主载荷探测控制模式,解决了火星恶劣环境、地火通信受限情况下多载荷协同探测难题,为实现多维度、多要素的火星科学探测,获得高精度、高指标的第一手科学探测数据提供了支撑。

由于这是中国首次实施火星探测,此次火星车载有效载荷探测是基于事先确定的人工规划进行的,这种方式在应对风险和复杂性问题时是有效的,但在应对机遇性探测问题方面尚有所欠缺。NASA 毅力号火星车引入了一种高级任务调度和执行方法,火星车上的计

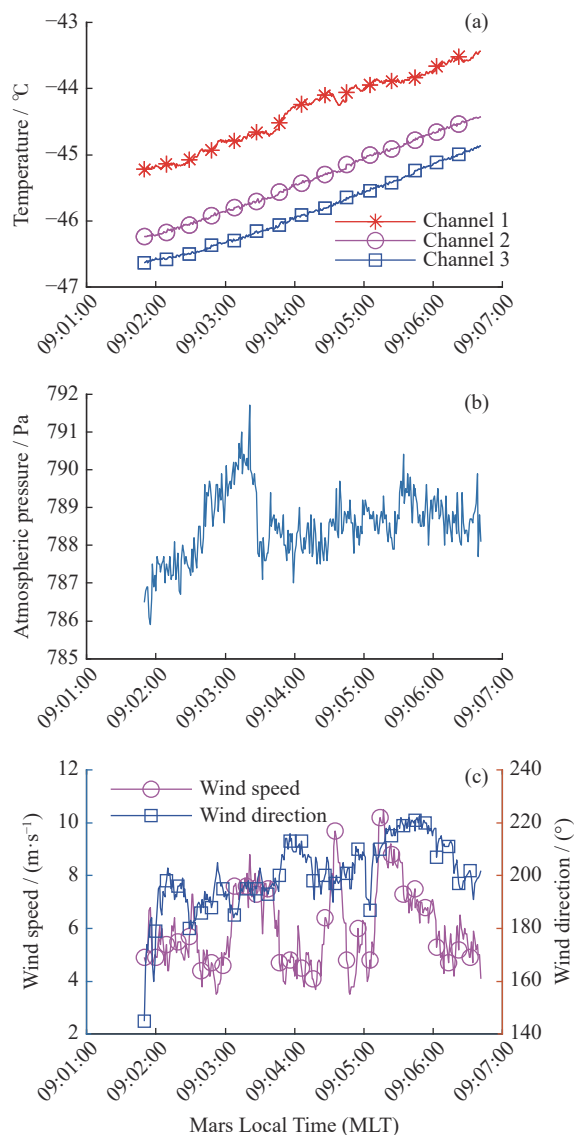


图 12 火星气象测量仪探测结果

Fig. 12 Measuring result of Mars Climate Station

计算机能够根据可用能量、实际活动持续时间和执行状态、测量到的温度和其他车上设备状态,创建或重新创建任务时间表,并自主执行^[11,12]。虽然这种在多约束因素下求解任务时间表的高级调度方法极具挑战性,但其可使火星车获得更多的探测机会。未来中国火星车科学探测也应具备这种自主规划科学探测的能力。

致谢 载荷探测结果(图 6~12)使用的原始数据由中国月球与深空探测工程地面应用系统处理制作,由中国国家航天局提供(<http://moon.bao.ac.cn>)。本文为展示载荷探测结果,对原始数据进行了图像还原、图像标注、绘制谱线、绘制曲线、数据校正等处理。

参考文献

- [1] ZOU Y L, ZHU Y, BAI Y F, *et al.* Scientific objectives and payloads of Tianwen-1, China's first Mars exploration mission[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **67**(2): 812-823
- [2] LI C L, ZHANG R Q, YU D Y, *et al.* China's Mars exploration mission and science investigation[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(4): 57
- [3] GROTZINGER J P, CRISP J, VASAVADA A R, *et al.* Mars science laboratory mission and science investigation[J]. *Space Science Reviews*, 2012, **170**(12/3/4): 5-56
- [4] VASAVADA A R. Mission overview and scientific contributions from the Mars Science Laboratory Curiosity Rover after eight years of surface operations[J]. *Space Science Reviews*, 2022, **218**(3): 14
- [5] ZHANG Rongqiao. China First MARS Exploration Project[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2021 (张荣桥. 中国首次火星探测工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2021)
- [6] SUN Zezhou, CHEN Baichao, JIA Yang, *et al.* The Tianwen-1 roving exploration technology for the martian surface[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2022, **52**(2): 214-225 (孙泽洲, 陈百超, 贾阳, 等. 天问一号火星巡视探测技术[J]. *中国科学:技术科学*, 2022, **52**(2): 214-225)
- [7] ZHANG Hui, LU Hao, YU Tianyi, *et al.* Teleoperation technology of Zhurong Mars Rover[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, **8**(6): 582-591 (张辉, 卢皓, 于天一, 等. “祝融号”火星车遥操作技术[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2021, **8**(6): 582-591)
- [8] SUN Zezhou, HAN Yu, BAI Fan, *et al.* Design and verification of the multinode and multisystem relay communication system for the Tianwen-1 Mars Probe[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2022, **52**(2): 226-236 (孙泽洲, 韩宇, 白帆, 等. 天问一号火星探测器多节点、多体制中继通信系统设计与验证[J]. *中国科学:技术科学*, 2022, **52**(2): 226-236)
- [9] WANG Lianguo, ZHU Yan, MA Miao, *et al.* Centralized payload control method for planetary rover exploration[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2019, **41**(2): 8-16 (王连国, 朱岩, 马苗, 等. 适用于行星巡视探测的集中式载荷控制方法[J]. *国防科技大学学报*, 2019, **41**(2): 8-16)
- [10] ZHANG Rongqiao, GENG Yan, SUN Zezhou, *et al.* Technical innovations of the Tianwen-1 mission[J]. *Acta Astronautica et Astronautica Sinica*, 2022, **43**(3): 326689 (张荣桥, 耿言, 孙泽洲, 等. 天问一号任务的技术创新[J]. *航空学报*, 2022, **43**(3): 326689)
- [11] AGRAWAL J, YELAMANCHILI A, CHIEN S A. Using explainable scheduling for the Mars 2020 rover mission[OL]. arXiv preprint arXiv: 2011.08733, 2020
- [12] KUHN S. From determinism to emergence: systems engineering a step change in execution on Mars[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2019